

SISTEMA de MEDICIÓN DE VELOCIDAD EN FLUIDOS EN TRES DIMENSIONES.

D. Hoyos, I. De Paul

Instituto de Energías no convencionales INENCO (CONICET)- Consejo de investigación UNSa

Avenida Bolivia 5150 C.P. 4400 – Salta

Tel. 0387-4225578 – e-mail: hoyos@unas.edu.ar

RESUMEN: Para optimizar el diseño de sistemas basados en energía solar es necesario conocer el campo de velocidad del fluido que realiza la transferencia de la energía. Este campo de velocidades puede ser muy simple o extremadamente complejo. En alguno de estos casos el campo de velocidades es de tres dimensiones. En este trabajo se describe un sistema de medida no destructivo que permite medir el campo de velocidades de un fluido en tres dimensiones. Lo cual permitirá mejorar el diseño de distintos sistemas que utilizan este tipo de transferencia de energía

Palabras clave: energía solar, instrumentación, convección natural

INTRODUCCION

Distintos sistemas que utilizan energía solar realizan la transferencia de energía a través de un fluido que puede ser agua o aire, utilizando convección natural o forzada. La medición de los campos de velocidades de fluidos permite optimizar el diseño de los mismos. Pero cualquier instrumento que se introduzca dentro del fluido provoca la variación del campo de velocidades que se desea medir. Por lo tanto es importante contar con un método de medida que no implique la introducción de un instrumento en el mismo.

El método de velocimetría de partículas denominado PIV (Adrian, 1998) es una técnica de medida no intrusiva que permite el estudio de las estructuras espaciales del flujo. PIV captura los vectores de velocidad de dos dimensiones en un plano del campo del fluido. El flujo es sembrado con pequeñas partículas de la misma densidad del fluido pero de distinto color. El plano de medida es iluminado por una luz láser. Perpendicular al plano de la medida se coloca una cámara, que toma la luz reflejada por las partículas sembradas en el fluido, en dos instantes de tiempo. Para calcular las velocidades se utiliza el método de la correlación cruzada (Weng et al, 1998). En la figura 1 se puede observar el esquema del sistema de medida.

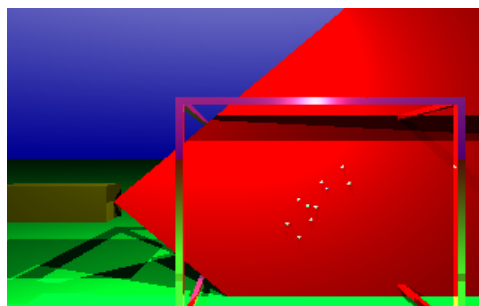


Figura 1: Esquema del sistema de medidas. Se puede observar El láser, el plano iluminado y las partículas que reflejan la luz.

El método descrito en el párrafo anterior, tiene la desventaja que permite medir solo las componentes del campo de velocidades que se encuentran en el plano de medida, si tiene componentes de velocidades en la otra dimensión, la misma no es tenida en cuenta y provoca además el error de bias (Wereley, 1998) en la medida de las componentes del campo.

Para poder analizar campos de velocidades complejos se crearon los sistemas de medidas de tres dimensiones. El método de medida basado en estereografía (Soloff et al, 1997) consiste en aplicar el método PIV de correlación cruzada, al campo de velocidades del fluido utilizando dos cámaras separadas una distancia determinada. Las diferencias presentes en los campos de velocidades en dos dimensiones obtenidos permiten inferir el valor de la velocidad en la tercera dimensión. Existen dos configuraciones posibles. El método de traslaciones (Postner, 1998), consiste en colocar paralelos los planos de imagen de las cámaras y el plano de medida. El método de desplazamiento angular (Couret et al, 2001) consiste en ubicar los planos imagen de las cámaras y el plano de medida con distintos ángulos de forma de obtener el mayor reflejo posible de las partículas iluminadas por el láser.

En este trabajo se pone a punto una técnica de medida de campos de fluidos en tres dimensiones denominada estereo piv que aprovecha el ancho finito del haz láser que ilumina las partículas para medir la tercera dimensión, utilizando las técnicas PIV para medir campos de velocidades en 2 D y las técnicas de estereografía, para componer las imágenes tomadas y obtener el resultado esperado. Se describirá como calibrar una cámara, como obtener las tres dimensiones de un objeto y como aplicar a las medidas obtenidas utilizando el método PIV.

CALIBRACIÓN DE LAS CAMARAS

Tomar una imagen con una cámara, consiste en proyectar un objeto tridimensional en un plano de dos dimensiones. Suponiendo en primera aproximación que la cámara no presentara ningún defecto, se puede utilizar el modelo pinhole.

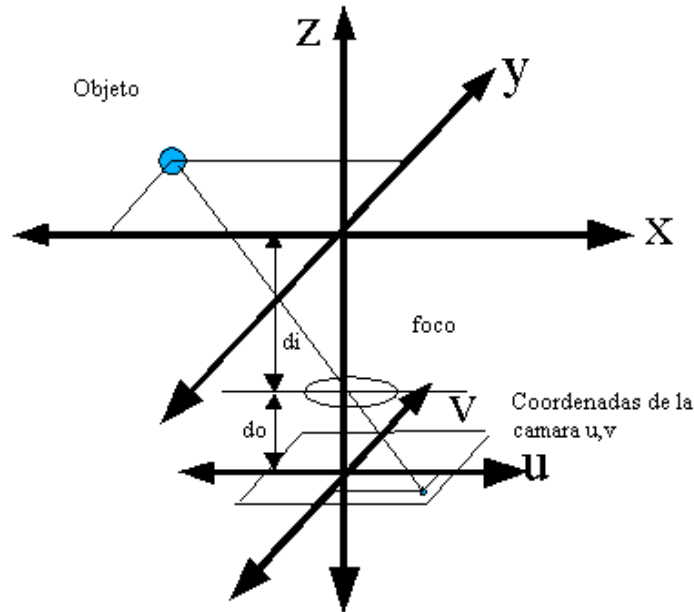


Figura2: Esquema de una cámara modelo pinhole

En la figura 2 se puede observar un esquema de la cámara. De la misma se puede inferir que las coordenadas del objeto proyectado sobre el plano imagen de la cámara son las correspondientes a la formula 1

$$\begin{aligned} u &= -\frac{di}{z}x \\ v &= -\frac{di}{z}y \end{aligned} \quad [1] \quad \begin{aligned} u &= a_{11}x + a_{12}y + a_{13}z + a_{14}t \\ v &= a_{21}x + a_{22}y + a_{23}z + a_{24}t \\ w &= a_{31}x + a_{32}y + a_{33}z + a_{34}t \end{aligned} \quad [2] \quad \begin{aligned} U &= u/w \\ V &= v/w \end{aligned} \quad [3]$$

En donde di es la distancia del foco al plano imagen, z es la distancia del foco al objeto (u, v) coordenadas del plano imagen, (x, y, z, t) coordenadas del objeto. Para simplificar el análisis se utiliza la matriz de proyección perspectiva de la cámara, la que surge de utilizar un sistema proyectivo de coordenadas en lugar del cartesiano, esto permite linealizar el sistema. La expresión de las mismas es la mostrada en la formula 2 en donde (u, v, w) son coordenadas proyectivas y finalmente la formula 3 muestra el cambio a coordenadas cartesianas donde (U, V) son coordenadas cartesianas.

Para encontrar la posición de un objeto se necesita conocer la matriz anterior por lo tanto el proceso de calibración de una cámara consiste en calcular los coeficientes a_{ij} . Con este fin se utiliza una grilla de referencia que se coloca en la posición del plano iluminado, sobre esta grilla se determina la posición de distintos puntos conocidos, reemplazando en [2] se puede construir la matriz de calibración de la cámara [4], resolviendo la misma se encuentran los coeficientes buscados (Young-Hoo, 1998).

$$\begin{aligned} x_1 \cdot a_{11} + y_1 \cdot a_{12} \cdot z_1 + a_{13} \cdot x_1 \cdot u_1 - a_{32} \cdot y_1 \cdot u_1 - a_{33} \cdot z_1 \cdot u_1 &= u_1 \\ x_1 \cdot a_{21} + y_1 \cdot a_{22} \cdot z_1 + a_{23} \cdot x_1 \cdot v_1 - a_{32} \cdot y_1 \cdot v_1 - a_{33} \cdot z_1 \cdot v_1 &= v_1 \\ &\vdots \\ x_n \cdot a_{11} + y_n \cdot a_{12} \cdot z_n + a_{13} \cdot x_n \cdot u_n - a_{32} \cdot y_n \cdot u_n - a_{33} \cdot z_n \cdot u_n &= u_n \\ x_n \cdot a_{21} + y_n \cdot a_{22} \cdot z_n + a_{23} \cdot x_n \cdot v_n - a_{32} \cdot y_n \cdot v_n - a_{33} \cdot z_n \cdot v_n &= v_n \end{aligned} \quad [4]$$

ESTEREOGRAFIA

Teniendo en cuenta que una cámara proyecta puntos del espacio tridimensional en un plano bidimensional, la misma no puede reconstruir el espacio tridimensional y para realizar esta reconstrucción se necesitan dos cámaras. El esquema experimental es el mostrado en la figura 3.



Figura 3: Montaje experimental de las dos cámaras filmadoras utilizadas para estereografía

Las cámaras se calibran según el punto anterior enfocadas sobre el plano donde se mide el campo de velocidades del fluido, cada una de las cámaras presenta su matriz de proyección perspectiva (en este caso a para la primera y b para la segunda) y para obtener la información tridimensional se deben combinar estas dos matrices y se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones.

$$\begin{aligned} (a_{11}-a_{31}.u_1).x+(a_{12}-a_{32}.u_1).y+(a_{13}-a_{33}.u_1).z+(a_{14}-a_{34}.u_1).t &= 0 \\ (a_{21}-a_{31}.v_1).x+(a_{22}-a_{32}.v_1).y+(a_{23}-a_{33}.v_1).z+(a_{24}-a_{34}.v_1).t &= 0 \\ (b_{11}-b_{31}.u_1).x+(b_{12}-b_{32}.u_1).y+(b_{13}-b_{33}.u_1).z+(b_{14}-b_{34}.u_1).t &= 0 \\ (b_{21}-b_{31}.v_1).x+(b_{22}-b_{32}.v_1).y+(b_{23}-b_{33}.v_1).z+(b_{24}-b_{34}.v_1).t &= 0 \end{aligned} \quad [5]$$

Resolviendo este sistema se obtiene la posición en 3D del punto analizado con este fin se realiza la descomposición SVD la cual convierte la matriz en un producto de tres matrices, donde la central es diagonal y son los autovalores del sistema. Se busca el autovalor cercano a cero y el autovector correspondiente es la solución buscada. Para poder cumplir con el objetivo de calibrar las imágenes se construye una librería en SCILAB denominada calibración.

ESTEREO PIV

Para aplicar la estereografía a las medidas realizadas con PIV analicemos el método de correlación cruzada. El mismo consiste en tomar dos imágenes del campo en tiempos distintos, dividir la primera imagen tomada en pequeñas ventanas, y correlacionar esa imagen con pequeñas ventanas de la siguiente imagen, en la fórmula [6] se muestra el algoritmo de correlación cruzada, el máximo de esa correlación representa el desplazamiento del fluido medido fórmula [7]. Por lo tanto este método nos entrega el vector desplazamiento $(\Delta u, \Delta v)$.

$$\text{corr} = \text{fft}^{-1}(\text{fft}(v1) * \text{conj}(\text{fft}(v2))) \quad [6]$$

$$[\Delta u, \Delta v] = \text{máximo}(\text{corr}) \quad [7]$$

El método propuesto consiste en tomar imágenes del plano de medida con dos cámaras colocadas separadas una cierta distancia. Se toman dos imágenes simultáneamente una en cada cámara y luego de transcurrido un tiempo se repite el procedimiento. El dispositivo experimental se encuentra esquematizado en la figura 3 y las imágenes tomadas se muestra en la figura 4 (son simulaciones).

Para medir el campo de velocidades debemos medir el desplazamiento de las partículas en una zona del espacio.

$$v = \Delta x / \Delta t, \Delta y / \Delta t, \Delta z / \Delta t \quad [8]$$

Se debe determinar los valores de (Δx , Δy , Δz) ya que Δt es conocido, el tiempo transcurrido entre una imagen y otra, Por esta razón se define como ventana un elemento de volumen. Cada una de las cámaras capturan una proyección de este elemento de volumen, que se visualiza como un rectángulo en cada una de las imágenes, estrictamente hablando es un hexágono pero por simplicidad se usa el rectángulo que circunscribe el hexágono. Para determinar estas ventanas se define una grilla tridimensional, con cada uno de los elementos de volúmenes y se proyectan los mismos sobre las imágenes tomadas por las cámaras. Sobre estas ventanas se mide el desplazamiento del fluido aplicando el método PIV convencional, obteniendo dos vectores de resultados. Solo queda determinar como componer estas imágenes para obtener el campo en tres dimensiones.

Si analizamos la medida utilizando coordenadas proyectivas tendremos que $U=F(x)$ donde U son las coordenadas proyectivas en el plano imagen, x son las coordenadas proyectivas del objeto y $F()$ es la matriz de proyección perspectiva de la cámara entonces:

$$\begin{aligned}U &= F(x) \\ U + \Delta U &= F(x + \Delta x) \\ \Delta U &= F(x + \Delta x) - F(x)\end{aligned}$$

donde ΔU son los vectores obtenidos en el párrafo anterior y debemos calcular Δx . Se proyecta el centro de masa del elemento de volumen sobre las imágenes tomadas por las cámaras utilizando la matriz de proyección perspectiva de la cámara [2]. Se suma los desplazamientos encontrados y se obtiene cuanto se desplazo el fluido en cada imagen. Con los vectores obtenidos se calcula el desplazamiento del fluido y finalmente se resta contra el centro de masa para obtener los incrementos buscados.

VERIFICACIÓN DEL METODO DE MEDIDA

Para verificar el funcionamiento del método se utilizan imágenes generadas por computadora con un campo de velocidades conocido. En este caso se generaron las imágenes utilizando renderización las partículas se encuentran confinadas en un paralelepipedos de 20 cm. de lado en el eje x e y respectivamente y 2 cm. en el eje Z. El campo aplicado es velocidad constante y las componentes de velocidad son $V_x = 0.3$, $V_y = 0.2$, $V_z = 0.1$

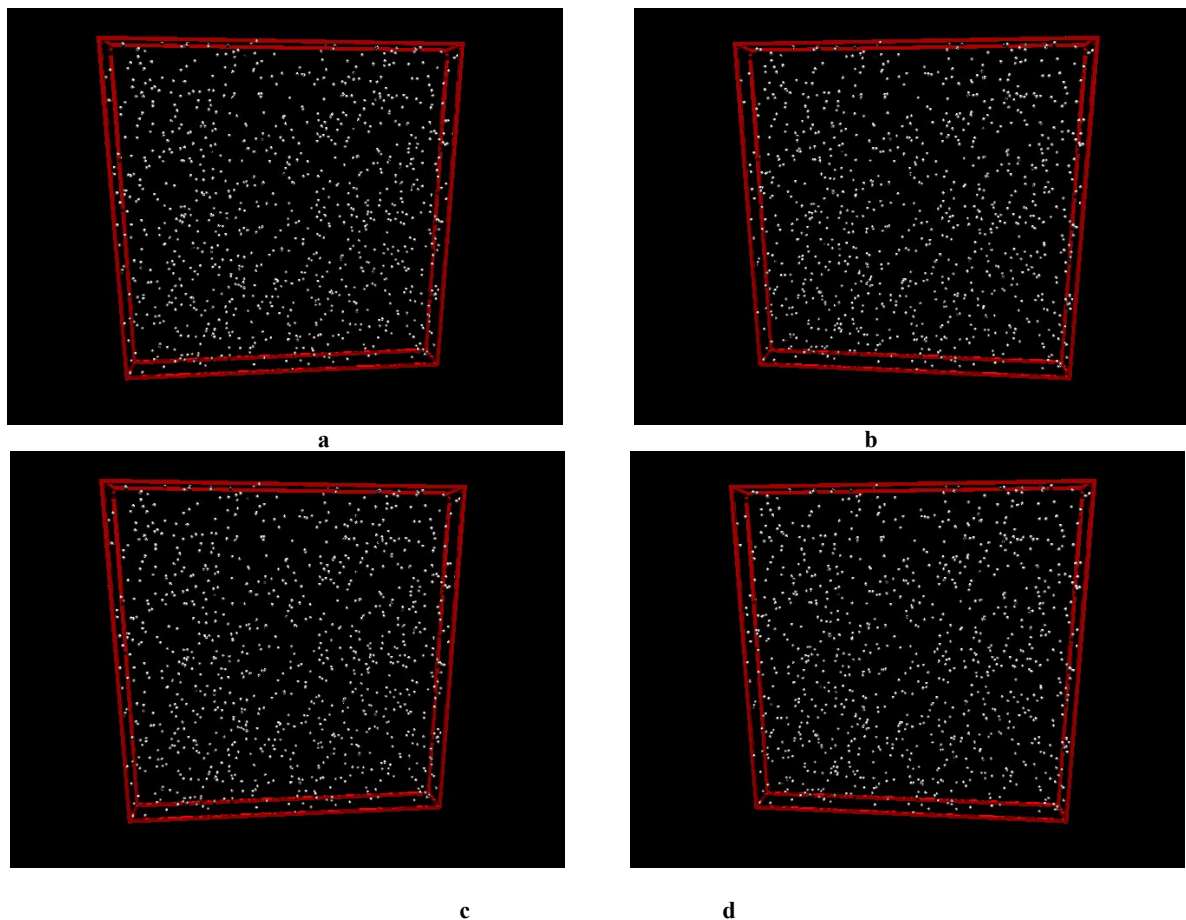


Figura 4: se puede observar 4 imágenes para estereo piv en donde la imagen a y b corresponden a las primeras dos imágenes tomadas por las dos cámaras y las imágenes c y d corresponden a las dos finales

Se obtienen las matrices de proyección perspectiva de las cámaras

$$\begin{aligned}u &= -19.56.x - 2.41.y - 12.25.z + 319.t \\v &= -0.43.x - 20.09.y - 6.38.z + 236.43.t \\w &= -0.0031.x - 0.0074.y - 0.0429.z + 1.t\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}u &= -17.75.x - 2.40.y - 14.53.z + 319.71.t \\v &= 0.31.x - 20.03.y - 6.10.z + 236.48.t \\w &= 0.0027.x - 0.0074.y - 0.046.z + 1.t\end{aligned}$$

Se generan las ventanas a utilizar definiendo los elementos de volúmenes ($x = 2$ cm., $y = 2$ cm. $Z = 2$ cm.) cubriendo todo el campo de medida. En la figura 5 se observa la proyección de un elemento de volumen sobre la imagen.

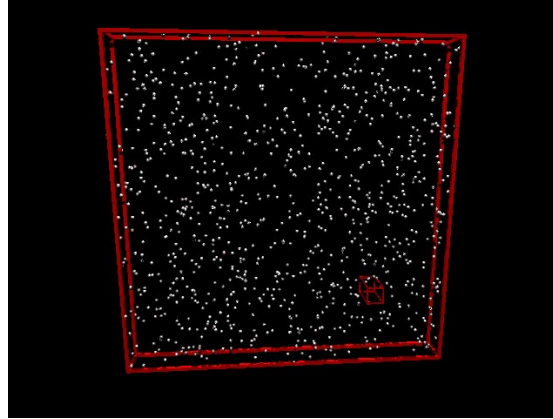


Figura 5: Elemento de volumen proyectado sobre una imagen

Se calcula utilizando el método de correlación cruzada el desplazamiento del elemento de volumen en ambas imágenes. Finalmente se compone las mismas y se obtiene el campo de velocidades buscado.

En la figura 6 se puede observar los resultados obtenidos. El primer grafico corresponde a la componente en x de la velocidad

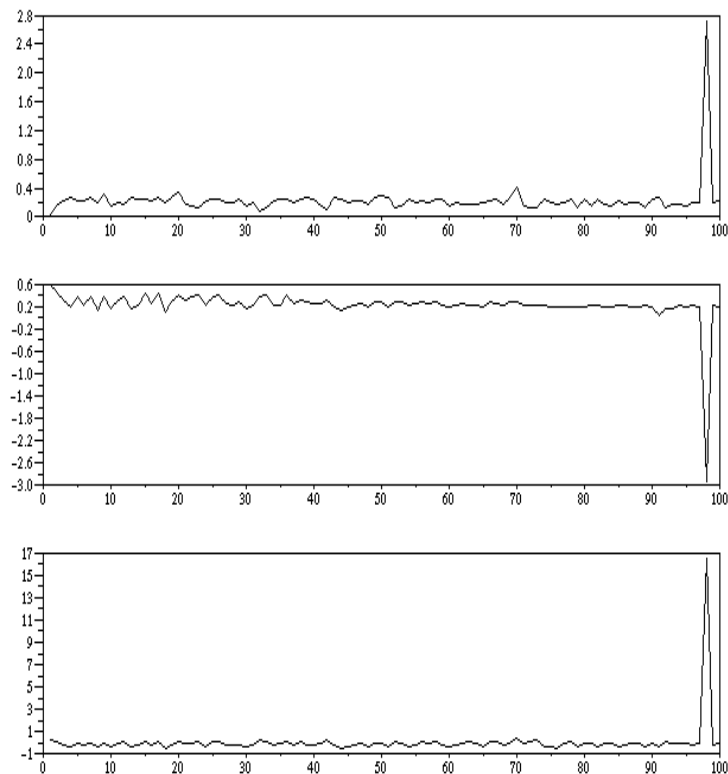


Figura 6: Grafico de velocidad vs posición

calculada por el método de medida. El segundo grafico corresponde a la componente en Y, el tercero a la componente en Z. En el eje horizontal se encuentran enumerados los paralepípedos de medida, partiendo de la posición (0,0,0) hasta la posición final. en $y=10$, $x=10$.

La medida tiene un error de un 5 % excepto en la zona de los extremos en donde aumenta significativamente. Debido al efecto del borde, la aberración de la lente., la cantidad de partículas presentes.

PROGRAMAS

Se desarrollo una serie de librerías que permiten realizar este método de medida, las mismas corren sobre SCILAB que es un programa matricial matemático similar al Matlab. Estas librerías permiten leer un archivo bmp, calcular el cambio de coordenadas, calcular la grilla de elementos de volúmenes, calcular utilizando correlación cruzada cada uno de los campos vistos por las cámaras y finalmente componer las imágenes y obtener la información en tres dimensiones.

CONCLUSIONES.

Se desarrollo un método de medición de campos de velocidades en fluidos de tres dimensiones utilizando el método PIV convencional, el cual permite medir campos de velocidades en fluidos sin necesidad de insertar sensores en el mismo. Se puede observar que el método diverge en los extremos, esto ocurre debido a que en ese lugar la cantidad de partículas disminuye. Tampoco puede medir valores de velocidad cuyo desplazamiento sea mayor que un elemento de volumen entre dos tomas de imágenes. El error introducido por las aberraciones de la lente, se puede mejorar cambiando el modelo de cámara utilizado. Todo el sistema depende que las cámaras estén enfocadas.

REFERENCIAS

W. Weng, G. Liao, W. Fan (1998) An improved cross-correlation method for (digital) particle image velocimetry
Coudert S*, J. Westerweel** and T. Fournel (2001) Comparison between asymmetric and symmetric stereoscopic DPIV
S M Soloff, R J Adrian and Z-C Liu Distortion compensation for generalized stereoscopic particle image velocimetry Meas. Sci. Technol. **8** (1997) 1441–1454.
J. D. Posner, M. L. Riethmuller (1998) Translation Stereoscopic Digital PIV Applied to a Turbulent Jet
Young-Hoo Kwon, (1998) DLT Method publicación Web
Wereley S. Carl D. Meinhart (1998) Accuracy Improvements in Particle Image Velocimetry Algorithms
Okamoto, K., Nishio, S., Saga, T. and Kobayashi, T., (2000), "Standard images for particle-image velocimetry," [*Meas. Sci. Technol.*](#), **11**, 685-691.

ABSTRACT

In this paper we made a method to measure flow using stereo piv, for application in natural convection in solar energy

Keywords: solar energy, convection measure